

一种基于相干积累 CPF 和 NUFFT 的 机动目标 ISAR 成像新方法

李 东¹, 占木杨¹, 粟 嘉², 方志平¹, 曹海林¹

(1. 重庆大学飞行器测控与通信教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 西北工业大学电子信息学院, 陕西西安 710072)

摘 要: 机动目标的复杂运动导致散射体回波信号多普勒频率时变, 给逆合成孔径雷达 (ISAR) 成像方位向处理带来困难. 而传统的距离-多普勒 (RD) 成像方法、Wigner-Ville distribution (WVD) 瞬时成像方法、Radon-Wigner 等成像方法由于成像效果差或运算效率低等因素, 不适合复杂运动目标的 ISAR 实时成像. 针对这些问题, 本文提出了一种基于相干积累三次相位函数 (CPF) 的机动目标 ISAR 成像新方法. 首先, 把平动补偿后的各距离单元数据, 通过 CPF 变换到时间-调频率平面. 然后, 利用各散射体自项能量平行于时间轴分布特性, 提出一种基于相干积累的交叉项和虚假伪峰抑制方法, 进而得到各散射体在频率-调频率平面的高分辨分布特性. 最后, 通过向频率轴上的投影得到该距离单元目标的方位 ISAR 图像, 并通过引入非均匀快速傅里叶变换 (NUFFT) 来降低算法计算复杂度. 计算机仿真处理结果验证了该方法的有效性.

关键词: 逆合成孔径雷达; 机动目标; 改进的三次相位函数; 非均匀快速傅里叶变换

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)09-2225-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.025

A Novel ISAR Imaging Method Based on Coherent Integration CPF and NUFFT for Maneuvering Target

LI Dong¹, ZHAN Mu-yang¹, SU Jia², FANG Zhi-ping¹, CAO Hai-lin¹

(1. Key Laboratory of Aircraft Tracking Telemetry & Command and Communication,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072 China)

Abstract: The azimuth time-varying Doppler frequency, caused by the complex movement of maneuvering target, deteriorates the azimuth focusing quality. Conventional Range-Doppler (RD) imaging algorithm, Wigner-Ville distribution (WVD) imaging algorithm and Radon-Wigner imaging algorithm, due to poor image quality and inefficient operation and so on, are unfit for ISAR imaging of the complex motion target. To solve these problems, a novel ISAR imaging method based on coherent integration cubic phase function (CPF) for maneuvering target is proposed in the letter. First, the echo data in a range bin after translational compensation are transformed into the time-chirp rate plane via CPF. Then, the auto-terms energy can be coherently integrated in the time-chirp rate distribution plane and can effectively suppress the troublesome cross-term interference and spurious peaks, and then obtain the distribution of the scatter energy in frequency-chirp rate plane. Finally, the azimuth ISAR image can be obtained via a simple maximization projection from the two-dimensional accumulated plot to the azimuth dimension, and the non-uniform fast Fourier transform (NUFFT) is also adopted to reduce the computing complexity. Computer simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: inverse synthetic aperture radar (ISAR); maneuvering target; modified cubic phase function (MCPF); non-uniform fast Fourier transform (NUFFT)

收稿日期: 2016-02-26; 修回日期: 2016-06-18; 责任编辑: 蓝红杰

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61501068, No. 61301120, No. 51377179); 重庆市前沿与应用基础研究计划 (No. CSTC2015jcyjA40001); 中央高校基金 (No. 106112015CDJXY500001)

1 引言

ISAR 是一种重要的高分辨成像雷达,可以全天候、全天时、远距离地获取非合作目标高分辨图像,因此在军事和民用上都具有非常重要的应用价值^[1]. 传统的基于傅里叶变换(FT)的 RD 成像算法在目标做均匀旋转的条件下可以获得目标高质量的 ISAR 图像^[2]. 但在实际情况下,由于目标的运动通常是复杂机动的,导致每个散射体回波信号的多普勒频率通常是时变的,使得基于传统的 RD 成像算法获得的 ISAR 图像出现散焦和拖尾,难以识别. 因此,如何在目标做复杂运动情况下获得其高分辨的 ISAR 图像已经成为近年来研究热点和难点^[3-6].

针对机动目标 ISAR 成像,近年来国内外学者提出多种距离-瞬时多普勒(Range-Instantaneous Doppler, RID)成像算法^[3-10]. 该 RID 算法主要包括两大类,一类是参数化方法,该类方法是把平动补偿后的每个距离单元的回波信号建模一类特殊信号(如,线性调频(LFM)信号,三次多项式信号),然后通过参数估计的方法获得回波信号的瞬时多普勒频率,进而实现对机动目标的 ISAR 成像;但这种方法由于需要精确估计所有散射体参数导致其存在计算量大和效率低等缺点^[3],而且,模型失配也会导致 ISAR 图像出现散焦和拖尾^[3]. 另一类是非参数化方法,该方法是用高分辨时频分析代替传统距离-多普勒算法中方位向的傅立叶变换实现对机动目标 ISAR 成像. 现有的非参数化方法主要有短时傅里叶变换(STFT)^[4],连续小波变换(CWT)^[5],虽然这两种方法没有交叉项,但存在分辨率低的问题,不能获得高分辨的机动目标 ISAR 图像. 维纳格变换(WVD)能提供最优的时频分布特征^[6,7],但由于其是非线性变换,交叉项的存在严重影响了 ISAR 成像质量. 为了抑制交叉项,随后提出了平滑维纳格变换(SPWVD)^[7],L 类的多项式维纳格变换等方法^[8],但这些都是以牺牲时频分辨率来抑制交叉项. 文献[9]提出一种基于改进 WVD 分布的机动目标 ISAR 成像算法,该算法同时获得了时频高分辨和交叉项抑制能力;但该算法由于需要 Keystone 插值导致算法存在计算复杂度高以及插值带来精度损失等问题.

针对上述问题,本文提出了一种基于相干积累 CPF 的机动目标 ISAR 成像新方法. 该方法主要由以下三步构成:首先,把平动补偿(包括包络对齐和初相校正)后的各距离单元数据,通过 CPF 变换到时间-调频率平面. 然后,利用各散射体自项能量平行于时间轴分布特性,提出一种基于相干积累的交叉项和虚假伪峰抑制方法,进而得到各散射体在频率-调频率平面的高分辨分布特性. 最后,通过向频率轴上的投影得到该距离单元目标的方位 ISAR 图像,并通过引入非均匀快速傅立叶

变换(NUFFT)来降低算法计算复杂度. 提出的算法具有以下优点:

(1)交叉项和虚假伪峰的抑制不以损失时频分辨率为代价;

(2)整个成像过程不涉及插值操作也不需要估计任何散射体参数,并通过引入 NUFFT 提高算法运行速度,使得算法易于实时处理;

(3)提出相干的 CPF 在抑制交叉项和虚假伪峰的同时利用了信号的幅度和相位信息使得算法具有较强的抗噪声能力,能在较低信噪比情况下获得高分辨机动目标的 ISAR 图像.

计算机仿真数据处理结果验证了该方法的有效性.

2 机动目标的 ISAR 转台回波信号模型

机动目标 ISAR 成像转台几何模型如图 1 所示;其中,把坐标原点 O 设为机动目标转台轴心, P 点为目标上任意一散射点, \mathbf{r}_p 为其位置向量. \mathbf{w} 是目标在三维坐标空间中的转动角速度向量,且在由向量 \mathbf{w} 和雷达视线方向(LOS)单位向量 \mathbf{R} 构成的 ISAR 成像平面内,转动角速度向量 \mathbf{w} 可分解为径向速度分量 \mathbf{w}_R 和有效的旋转向量 \mathbf{w}_e , \mathbf{w}_e 会导致散射体多普勒频率变化,进而实现对目标高分辨 ISAR 成像. 由图 1 可知,散射点 P 的线速度为 $\mathbf{w}_e \times \mathbf{r}_p$,其相应的径向分量为 $(\mathbf{w}_e \times \mathbf{r}_p) \cdot \mathbf{R}$;假设目标的平动径向速度分量 v_r ,则可得散射点 P 的瞬时多普勒频率可写为

$$f_d = \frac{2}{\lambda} (v_r + (\mathbf{w}_e \times \mathbf{r}_p) \cdot \mathbf{R}) \quad (1)$$

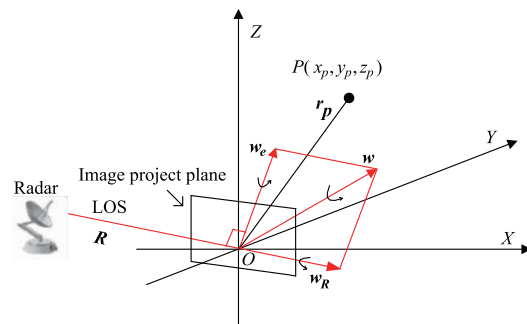


图1 机动目标三维转台模型

其中,符号 \times 和 \cdot 分别表示矢量的外积和内积运算; λ 为发射信号波长. 在 ISAR 成像中,相干积累时间一般不会太长(2~3s)^[1,2];因此,可以认为在相干积累时间内成像平面近似不变,故散射点 P 的方位多普勒频率可以进一步展开为

$$f_d = \frac{2}{\lambda} [v_r + \omega_{ex} (y_p R_z - z_p R_y) + \omega_{ey} (z_p R_x - x_p R_z) + \omega_{ez} (x_p R_y - y_p R_x)] \quad (2)$$

其中 $(\omega_{ex}, \omega_{ey}, \omega_{ez})$, (x_p, y_p, z_p) 和 (R_x, R_y, R_z) 分别

为目标径向转动向量 w_e , 散射点 P 位置向量 r_p 和视线单位向量 R 在三维坐标轴上的投影分量; v_r 为目标平动分量. 对较为复杂的机动目标而言, v_r, w_{ex}, w_{ey} 和 w_{ez} 一般是时变的, 而由于相干积累时间较短, 高次项的影响忽略, 因此, 可以近似认为随时间线性变化^[9], 其表示为

$$\begin{aligned} v_r &= v_0 + a_0 t_m \\ w_{ex} &\approx w_x + \alpha_x t_m \\ w_{ey} &\approx w_y + \alpha_y t_m \\ w_{ez} &\approx w_z + \alpha_z t_m \end{aligned} \quad (3)$$

其中, t_m 为方位慢时间变量; w_x, w_y 和 w_z 以及 α_x, α_y 和 α_z 分别为 w_{ex}, w_{ey} 和 w_{ez} 的常数项和一次项系数. 把式(3)代入式(2), 目标散射点 P 在转台模型下的瞬时斜距可写为

$$\begin{aligned} R_p(t_m) &= \int_{t_0}^{t_m} \frac{\lambda}{2} f_d dt_m \\ &= R_p(t_0) + (v_0 + w_l \cdot r) t_m + \frac{1}{2} (a_0 + \alpha_l \cdot r) t_m^2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, t_0 为方位相干积累时间的起始时刻, $R_p(t_0)$ 为雷达到目标的初始距离, $w_l = [w_x, w_y, w_z]$, $r = [y_p R_z - z_p R_y, z_p R_x - x_p R_z, z_p R_x - x_p R_z]$, $\alpha_l = [\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z]$. 根据式(4)可知, 由于目标的机动特性, 使得目标上各散射点在方位相位上具有调频特性, 导致机动目标方位聚焦困难.

假设雷达发射线性调频信号(LFM), 则散射点 P 的回波信号经过去载波处理和距离压缩可得

$$s(t_r, t_m) = \sigma_p B_r \text{sinc} \left(B_r \left(t_r - \frac{2R_p(t_m)}{c} \right) \right) \exp \left(-j \frac{4\pi R_p(t_m)}{\lambda} \right) \quad (5)$$

其中, σ_p 为散射体反射系数, B_r 为发射信号的带宽, t_r 为距离快时间变量, c 为光传播速度, $\lambda = f_c/c$ 为发射信号波长, f_c 为发射信号载频. 由式(5)可知, $R_p(t_m)$ 会引起包络徙动和多普勒频率时变, 因此, 为了得到机动目标的高分辨率 ISAR 成像, 需要完成包络徙动校正和方位向聚焦处理. 包络徙动校正^[10]包括平动补偿(包络对齐和初相校正)和越距离单元徙动校正, 其校正方法主要有相关法, 自聚焦以及 Keystone 变换等方法, 这不是本文重点考虑内容; 本文所提出的新方法主要是处理方位向的时变特性. 在完成距离徙动校正后, 所有散射体会位于相应的距离单元内; 假设某一距离单元 l 内散射体个数为 K , 把式(4)带入式(5)中, 整理可得

$$s_l(t_m) = \sum_{k=1}^K A_k \exp(j2\pi(b_{k,0} + b_{k,1}t_m + b_{k,2}t_m^2)) \quad (6)$$

其中, $A_k = \sigma_p B_r \text{sinc} [B_r (t_r - 2R_p(t_0)/c)]$, $b_{k,0} = -2R_p(t_0)/\lambda$, $b_{k,1} = -2(v_0 + w_l \cdot r)/\lambda$, $b_{k,2} = -(a_0 + \alpha_l \cdot r)/\lambda$, 分别为第 k 个散射体所对应的幅度, 初始相位, 中心频率和调频率等参数. 由式(6)可知, 任意一个距离门的信号可建模为多成分 LFM 信号, 其中

$\{b_{k,i}\}_{i=0}^2$ 为 LFM 信号对应的系数.

3 提出的快速机动目标 ISAR 成像算法

在第二部分, 我们已经把经过平动补偿, 越距离单元徙动校正和距离压缩后的距离单元的回波信号建模为多成分的 LFM 信号. 在此基础上, 下面我们给出一种基于改进的 CPF 和 NUFFT 的快速 ISAR 成像方法.

3.1 一种新的相干积累的 CPF

根据文献[11]可知, 式(6)的 CPF 定义为

$$\begin{aligned} \text{CPF}(t_m; f_{\tau_m^2}) &= \int s_l(t_m + \tau_m) s_l(t_m - \tau_m) \exp(-j2\pi f_{\tau_m^2} \tau_m^2) d\tau_m^2 \\ &= \sum_{k=1}^K A_k^2 \exp[j2\pi\varphi_k(t_m)] \int \exp[-j2\pi(f_{\tau_m^2} - 2b_{k,2})\tau_m^2] d\tau_m^2 \\ &\quad + \text{CPF}_{l,c\text{-terms}}(t_m; f_{\tau_m^2}) + \text{CPF}_{l,n\text{-terms}}(t_m; f_{\tau_m^2}) \\ &= \underbrace{\sum_{k=1}^K A_k^2 \exp[j2\pi\varphi_k(t_m)] \delta(f_{\tau_m^2} - 2b_{k,2})}_{\text{auto-terms}} \\ &\quad + \underbrace{\text{CPF}_{l,c\text{-terms}}(t_m; f_{\tau_m^2}) + \text{CPF}_{l,n\text{-terms}}(t_m; f_{\tau_m^2})}_{\text{cross-terms}} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 τ_m 是延迟变量, $f_{\tau_m^2}$ 为延迟变量 τ_m^2 对应的频率变量, $\varphi_k(t_m) = 2\pi(b_{k,0} + b_{k,1}t_m + b_{k,2}t_m^2)$, $\delta(\cdot)$ 是狄拉克函数, $\text{CPF}_{l,c\text{-terms}}(t_m; f_{\tau_m^2})$ 和 $\text{CPF}_{l,n\text{-terms}}(t_m; f_{\tau_m^2})$ 分别是傅里叶变换后对应的交叉项和噪声项分量.

根据式(7)可知, $\text{CPF}(t_m; f_{\tau_m^2})$ 在 $f_{\tau_m^2} = 2b_{k,2}$ 处产生一个尖峰值; 因此, 二阶系数能被估计通过下式

$$\hat{b}_{k,2} = \frac{\arg \max_{f_{\tau_m^2}} |\text{CPF}(t_m; f_{\tau_m^2})|}{2} \quad (8)$$

其中“arg max”表示最大值处对应的频率.

然而, 从式(7)可知, 对多成分 LFM 信号而言, 由于 CPF 非线性特性导致交叉项和虚假伪峰出现, 使得参数估计性能急剧下降, 从而如何抑制交叉项和虚假伪峰是一个必须解决的问题. 幸运的是, 根据式(7)可知, 自项能量沿着平行于时间轴的直线 $f_{\tau_m^2} = 2b_{k,2}$ 分布, 然而交叉项在 $(t_m, f_{\tau_m^2})$ 域是分散的, 它们的位置随 t_m 变化. 为了直观地描述这种现象, 图 2(a) 中给出三分量的 LFM 信号的 CPF 的 $(t_m, f_{\tau_m^2})$ 平面能量分布图, LFM 相关参数如表 1 所示, 其中采样点数 $N = 256$. 可以明显地看出, 自项能量分别沿平行于时间轴的直线 $f_{\tau_m^2} = 2b_{k,2}$ ($k = 1, 2, 3$) 分布, 且伪峰和交叉项则杂乱地分布在 $(t_m, f_{\tau_m^2})$ 域内.

表 1 各成分 LFM 的参数

	A_k	$b_{k,0}$	$b_{k,1}$	$b_{k,2}$
$k = 1$	1.0	0	0.1π	$0.2\pi/N$
$k = 2$	1.0	0	-0.1π	$-0.2\pi/N$
$k = 3$	1.0	0	0	$-0.05\pi/N$

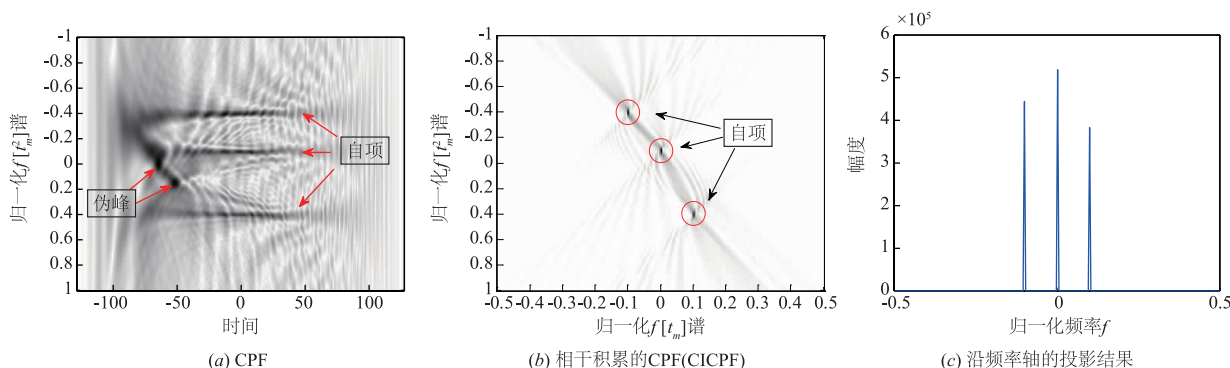


图2 三分量LFM信号的CPF和CICPF

利用自项能量沿平行于时间轴分布这一特性,文献[12, 13]分别提出了乘积型 CPF (PCPF) 和积分型 CPF (ICPF) 两种算法来抑制交叉项和虚假伪峰对多成分 LFM 信号参数估计的影响. PCPF 通过取不同时刻的 CPF 切片相乘来抑制交叉项和虚假伪峰^[12], 但该算法存在两个缺点, 一方面该算法只利用了有用信号的部分能量, 另一方面该方法对噪声抑制能力有限. PCPF 定义为,

$$\text{PCPF}(f_{\tau_z^2}) = \prod_{q=1}^Q \text{CPF}(t_{m,q}; f_{\tau_z^2}) \quad (9)$$

其中 Q 为 CPF 切片相乘的个数, $t_{m,q}$ 表示不同时刻下的切片.

在 ICPF 算法中, 通过对自项能量沿平行于时间轴的直线幅度积累来抑制交叉项和虚假伪峰^[13], 其定义为,

$$\text{ICPF}(f_{\tau_z^2}) = \sum_{t_m} |\text{CPF}(t_m; f_{\tau_z^2})| \quad (10)$$

尽管 ICPF 算法中自项能量得到充分利用在一定程度上抑制了交叉项和虚假伪峰, 但是该算法仅利用了信号的幅度信息, 是一种非相干积累算法, 因此该算法性能受限于一定的信噪比. 针对以上两种算法的不足, 在本文中, 通过进一步挖掘同时利用信号的幅度和相位信息, 提出一种相干积累的 CPF (CICPF) 算法, 该算法可以实现自项能量沿平行于时间轴的直线进行相干积累, 因此该算法除了具有很强的交叉项和虚假伪峰抑制能力外, 抗噪声性能明显优于 PCPF 和 ICPF 两种方法, 并且通过引入 NUFFT 来降低计算复杂性; 在此基础上, 给出一种高效的机动目标 ISAR 成像算法.

由于式(7)中 $\varphi_k(t_m)$ 含有 t_m^2 平方项, 直接沿 t_m 积分会导致自项能量散焦. 为了消除平方项的影响, 在此引入狄拉克函数的取样性质, 即

$$\delta(t_m - t_c)g(t_m) = g(t_c)\delta(t_m - t_c) \quad (11)$$

其中, $g(t_m)$ 表示以 t_m 为自变量的函数, t_c 为某一固定的时间值.

根据式(11), 很自然地想到通过设计出一个合适

的相位函数用其乘以对应的 CPF 的切片来消除平方项相位; 基于这种思路, 利用狄拉克函数的取样性质提出一种改进的 CPF (MCPF) 算法, 其定义为

$$\begin{aligned} \text{MCPF}(t_m; f_{\tau_z^2}) &= \text{CPF}(t_m; f_{\tau_z^2}) \exp[-j2\pi f_{\tau_z^2} t_m^2] \\ &= \sum_{k=1}^K A_k^2 \exp[-j2\pi(f_{\tau_z^2} - 2b_{k,2})t_m^2] \delta_{\tau_z^2}(f_{\tau_z^2} - 2b_{k,2}) \\ &\quad \times \exp[j4\pi(b_{k,0} + b_{k,1}t_m)] \\ &\quad + \underbrace{\text{MCPF}_{l,c\text{-terms}}(t_m; f_{\tau_z^2}) + \text{MCPF}_{l,n\text{-terms}}(t_m; f_{\tau_z^2})}_{\text{cross-terms}} \\ &= g(f_{\tau_z^2} = 2b_{k,2}) \sum_{k=1}^K A_k^2 \delta_{\tau_z^2}(f_{\tau_z^2} - 2b_{k,2}) \\ &\quad \times \exp[j4\pi(b_{k,0} + b_{k,1}t_m)] \\ &\quad + \underbrace{\text{MCPF}_{l,c\text{-terms}}(t_m; f_{\tau_z^2}) + \text{MCPF}_{l,n\text{-terms}}(t_m; f_{\tau_z^2})}_{\text{cross-terms}} \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $g(t_m; f_{\tau_z^2}) = \exp[-j2\pi(f_{\tau_z^2} - 2b_{k,2})t_m^2]$. 对式(12)沿 t_m 做 FT, 可得

$$\begin{aligned} \text{CICPF}(f_{\tau_z^2}; f_{\tau_z^2}) &= \int \text{MCPF}(t_m; f_{\tau_z^2}) \exp(-j2\pi f_{\tau_z^2} t_m) dt_m \\ &= g(f_{\tau_z^2} = 2b_{k,2}) \sum_{k=1}^K A_k^2 \exp(4\pi b_{k,0}) \\ &\quad \times \underbrace{\delta_{\tau_z^2}(f_{\tau_z^2} - 2b_{k,2}) \delta_{\tau_z^2}(f_{\tau_z^2} - 2b_{k,1})}_{\text{auto-terms}} \\ &\quad + \underbrace{\text{CICPF}_{l,c\text{-terms}}(f_{\tau_z^2}; f_{\tau_z^2}) + \text{CICPF}_{l,n\text{-terms}}(f_{\tau_z^2}; f_{\tau_z^2})}_{\text{cross-terms}} \end{aligned} \quad (13)$$

由式(13)可知, 在完成相干积累处理后, 各散射体自项在 $(f_{\tau_z^2}; f_{\tau_z^2})$ 域中点 $(2b_{k,1}, 2b_{k,2})$ 处聚焦为一个高分辨的亮点, 即得到距离单元回波信号在频率-调频率 $(f_{\tau_z^2}; f_{\tau_z^2})$ 平面的高分辨聚集特性. 如图 2(b) 所示, 可以明显地看出, CICPF 算法对三分量的 LFM 进行自项积累的同时很好地抑制了交叉项和伪峰, 在 $(2b_{k,1}, 2b_{k,2})$ ($k=1, 2, 3$) 三点处聚焦为三个高分辨的亮点.

3.2 基于 NUFFT 算法的 CICPF 快速实现

快速傅里叶变换(FFT)算法极大的降低了离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)的计算复杂度,使得快速实现成为可能.遗憾的是,FFT 算法对数据的采样具有严格的要求,其数据分布局限于均匀分布的网格上.由式(7)可知,CPF 是对变量 τ_m^2 进行变换,是非均匀离散傅里叶变换(NUDFT),导致传统的 FFT 算法失效.因此,为了克服传统 FFT 算法的局限性;本文提出利用非均匀快速傅里叶变换(NUFFT)来提高算法的计算速度.

类似于均匀采样数据离散傅里叶变换,非均匀采样数据的离散傅里叶变换可写为

$$\hat{z}_k = \sum_{l=1}^M z_l \exp(-j2\pi x_l k/N), k = -N/2, \dots, N/2 + 1 \quad (14)$$

其中, z_l 为时域非均匀采样数据, x_l 为非均匀采样数据 z_l 对应的非均匀采样位置.这里通过插值指数项来代替插值时域非均匀采样数据 z_l ,进而实现快速非均匀傅里叶变换.

令 $\hat{\varphi}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sinh(\alpha \sqrt{K^2 - x^2})}{(\sqrt{K^2 - x^2})}$, $-K \leq x \leq K$, $\varphi(\xi) = \begin{cases} I_0(K \sqrt{\alpha^2 - \xi^2}), & |\xi| \leq \alpha \\ 0, & |\xi| > \alpha \end{cases}$, 其中, K 为插值核函数长度.根据文献[14],对指数项函数可进行如式(15)的展开式:

$$\exp(-jx\xi) = \frac{(2\pi)^{-1/2}}{\varphi(\xi)} \sum_{m \in Z} \hat{\varphi}(x-m) \exp(-jm\xi) \quad (15)$$

其中 $|\xi| \leq \pi/c$, c 表示过采样因子,令 $x = cx_l$, $\xi = 2\pi k/(cN)$, $|k| \leq N/2$, $\alpha = \pi(2 - 1/c) - 0.01$, $\varphi_k = \varphi(2\pi k/(cN))$, $\hat{\varphi}_{lm} = \frac{1}{2\pi} \hat{\varphi}(cx_l - (\mu_l + m))$,把式(15)代入式(14)可得其频率均匀输出为

$$\hat{z}_k = \frac{1}{\varphi_k} \sum_{j=-cN/2}^{cN/2-1} u_j \exp(-j2\pi kj/(cN)) \quad (16)$$

式(16)中 u_j 为

$$u_j = \sum_{l=1}^M \sum_{m \in Z} z_l \hat{\varphi}_{l,j+cmN-\mu_l}, j = -cN/2, \dots, cN/2 - 1 \quad (17)$$

其具体的 NUFFT 的实现过程如图 3 所示,首先由输入的非均匀采样数据 z_l 和非均匀位置 x_l 计算出中间参数 $\mu_l, \varphi_k, \hat{\varphi}_{lm}$,然后按式(17)计算中间变量 u_j ,最后由式(16)利用快速 FFT 计算得到其相应的频率输出值 \hat{z}_k .

根据上述 NUFFT 原理,对提出的 CICPF 中非均匀傅里叶变换用 NUFFT 来快速实现来降低算法的计算复杂度,即式(12)可写为

$$\begin{aligned} & \text{CICPF}(f_{t_m}; f_{\tau_m^2}) \\ &= \text{FFT}_{t_m} [[\text{NUFFT}_{\tau_m^2} [\text{CPF}(t_m; f_{\tau_m^2})]] \exp(-j\pi f_{\tau_m^2} t_m^2)] \\ &= \sum_{k=1}^K \underbrace{A_k^2 \delta_{\tau_m^2}(f_{\tau_m^2} - 2b_{k,2}) \delta_{t_m}(f_{t_m} - 2b_{k,1})}_{\text{auto-terms}} \\ & \quad + \underbrace{\text{CICPF}_{l,c\text{-terms}}(f_{t_m}; f_{\tau_m^2}) + \text{CICPF}_{l,n\text{-terms}}(f_{t_m}; f_{\tau_m^2})}_{\text{cross-terms}} \quad (18) \end{aligned}$$

其中 $\text{NUFFT}_{\tau_m^2}$ 表示对变量 τ_m^2 进行 NUFFT 运算, FFT_{t_m} 表示对变量 t_m 进行快速傅里叶变换.表 2 给出了 CPF 和 CICPF 分别基于 NUFFT 和 NUDFT 变换的计算量对比;其中, M 为 DFT 的搜索点数, N 为 t_m 数据的长度.从表 2 可知,提出的基于 NUFFT 的 CICPF 算法不需要做任何参数搜索,且具有高的抗噪声性能;使得提出的 ISAR 成像算法容易实时实现,且在低信噪比环境下也能得到聚焦良好的 ISAR 图像.

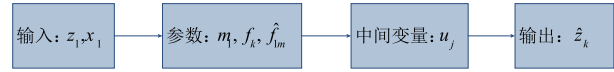


图3 NUFFT实现示意图

表 2 计算量比较

方法	基于 DFT 的 CPF	基于 DFT 的 CICPF
计算量	$O(MN)$	$O(MN) + O(N \log_2 N)$
方法	基于 NUFFT 的 CPF	基于 NUFFT 的 CICPF
计算量	$O(N \log_2 N)$	$2O(N \log_2 N)$

3.3 基于 CICPF 的机动目标 ISAR 成像算法

由式(18)可知,本文提出的 CICPF 算法可以得到距离单元内多散射体回波信号在频率-调频率 $(f_{t_m}; f_{\tau_m^2})$ 平面类似于时频分析的高分辨聚集特性,其频率轴 f 反应了回波信号的多普勒中心也就是目标在方位向的位置;因此,在频率-调频率 $(f_{t_m}; f_{\tau_m^2})$ 平面上沿调频率轴 $f_{\tau_m^2}$ 求最大绝对值然后投影到频率轴 f_{t_m} 上,就可以得到该距离单元的方位 ISAR 图像.

$$s(f) = \max(|\text{CICPF}(f_{t_m}; f_{\tau_m^2})|) \quad (19)$$

并且由于在时间-调频率平面内交叉项能量分布是分散的,因此相干积累后交叉项和虚假伪峰得到很好的抑制且不损失时频分辨率.经过上述处理后,交叉项和虚假伪峰虽然已经被很好抑制,但仍有一些剩余,但相比于自项的完全聚集的能量其相对很小;这里我们可以通过设置一个相应的门限,剔除掉剩余的交叉项和虚假伪峰的影响,就可以得到该距离单元的高分辨的 ISAR 像.在成像过程中,剔除剩余交叉项和虚假伪峰的门限值利用全局能量最大作为基准信息,并通过剔除最大值 $-3\text{dB} \sim -4\text{dB}$ 以下的值进行 ISAR 成像.

图 2(c) 中给出了表 1 中三个 LFM 信号的 CICPF 在频率轴 f_{t_m} 上的投影结果,可以看出交叉项和虚假伪峰得到很好的抑制,且其位置反映了散射体的方位向

位置.同时,对所有距离单元的回波数据,重复上述处理方法然后组合在一起,就可以得到整个机动目标高分辨 ISAR 像,整个算法成像流程图如 4 所示.并且从上述分析可知,本文提出的方法在整个成像过程中不需要进行任何搜索和参数估计,使得该算法十分高效,适合实时成像.

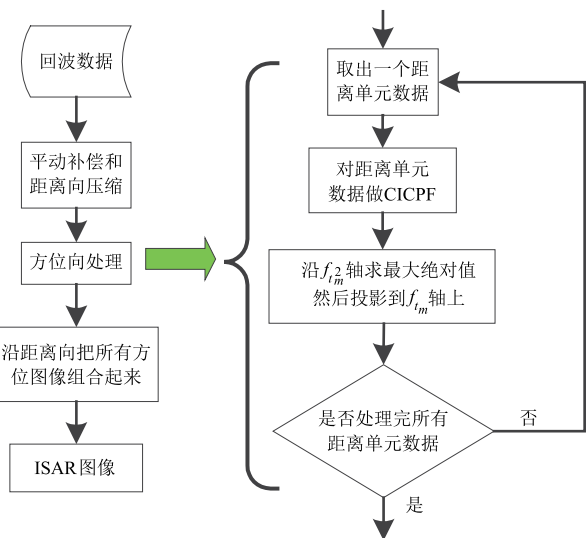


图4 本文提出算法成像流程图

4 仿真结果及其分析

为了验证本文提出算法的有效性,现把本文所提出方法应用到机动飞行的飞机目标进行 ISAR 成像.雷达工作参数和飞机运动模型见表 3.仿真中使用到的飞机散射模型共包括 37 个散射点,在成像时信噪比分别为 $\text{SNR} = 5\text{dB}$ 和 $\text{SNR} = -5\text{dB}$,雷达距离目标中心的初始距离为 20km.本次仿真实验中,利用文献[15]的包络对齐方法进行平动补偿,然后采用 Keystone Transform 进行越距离单元徙动校正,进而利用各类典型的 ISAR 成像算法(RD 算法,STFT 算法,WVD 算法,SPWVD 算法)以及本文提出的成像算法进行 ISAR 成像.

表 3 雷达参数和目标运动模型

载波频率	10GHz	波长	0.03m
传输信号带宽	200MHz	距离采样频率	300MHz
脉冲重复频率	300Hz	有效回波数	256
平动系数 (v_0, a_0)	速度 30m/s	加速度 2m/s ²	
转动系数 (w_0, α_0)	旋转角速度 0.05rad/s	旋转加速度 0.05rad/s ²	

图 5 给出了在 $\text{SNR} = 5\text{dB}$ 下没有经过平动补偿和越距离单元徙动校正直接进行距离压缩和 RD 算法成像的结果,其中成像图纵坐标为相对初始距离的相对

距离位置,0m 代表雷达距离目标中心的初始距离 20km,10m 代表 20km + 10m,以此类推.由图 5(a)可以看出,由于没有进行经过平动补偿和越距离单元徙动校正,目标能量散布在几个不同的距离门内;直接利用传统的 RD 算法对目标成像将会产生严重散焦,如图 5(b)所示,几乎无法获得目标的有效信息.图 6 表示经过平动补偿和越距离单元徙动校正后进行距离压缩和 RD 算法成像的结果.由图 6(a)可以看出经过平动补偿(包括包络对齐和初相校正)和越距离单元徙动校正后,目标能量集中在一个距离门内;图 6(b)给出了对应的 RD 算法成像结果,与图 5(b)相比,可以看见模糊的飞机轮廓,但由于飞机具有角加速度运动使得回波数据在距离包络对齐后方位向数据体现出二次相位项的特性,目标成像使方位图像散焦.

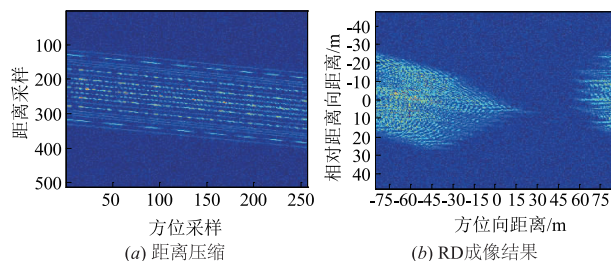


图5 $\text{SNR} = 5\text{dB}$ 下没有经过平动补偿和越距离单元徙动校正直接进行距离压缩和 RD 成像结果

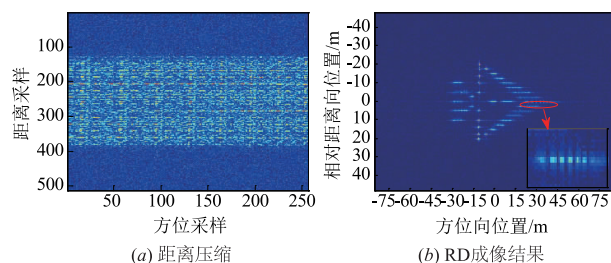


图6 $\text{SNR} = 5\text{dB}$ 下经过平动补偿和越距离单元徙动校正后进行距离压缩和 RD 成像结果

以下,将经过平动补偿,越距离单元徙动校正和距离压缩后的回波信号,利用 STFT 算法,WVD 算法,SPWVD 算法以及本文提出的成像算法进行 ISAR 成像.为定量的评估本文算法,引入信息熵作为各算法成像质量好坏的一个判决标准,熵值越低则成像质量越好;反之,亦然.图像 $g(m, n)$ 的信息熵可定义为^[3]:

$$I = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{|g(m, n)|^2}{S} \ln \frac{S}{|g(m, n)|^2} \quad (20)$$

其中, $S = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |g(m, n)|^2$, m 表示脉冲数, n 表示距离单元数.在这一节中,通过计算不同的成像算法下的图像数据的信息熵来评估成像算法的性能.

图 7 给出了 $\text{SNR} = 5\text{dB}$ 下 STFT 算法,WVD 算法,SPWVD 算法和本文提出的算法的 ISAR 成像结果.从

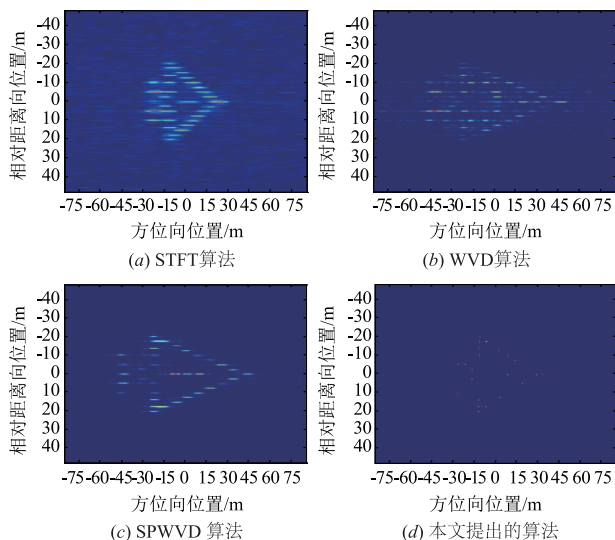


图7 SNR=5dB下各成像算法对比

图 7(a)可知,由于 STFT 为线性变换故其不受交叉项影响,但其时频分辨率有限导致 ISAR 图像不清晰;图 7(b)给出了基于 WVD 的 ISAR 成像结果,虽然 WVD 具有较好的时频聚焦特性,但由于大量的交叉项的影响导致图像模糊不清难以识别;SPWVD 是通过牺牲时频分辨能力来抑制交叉项的影响,如图 7(c)所示,因此其成像结果和基于 STFT 方法一样分辨率不高;图 7(d)给出了本文所提出基于 CICPF 的算法成像结果,由于

提出的算法不以损失时频分辨率来抑制交叉项和虚假伪峰,因此得到了聚焦良好的高分辨 ISAR 图像;并在成像过程中引入 NUFFT 的快速算法使得提出的方法运算量较小,易于实现.由表 4 中 5dB 下各成像算法的图像信息熵也可以看出,本文提出的 ISAR 成像算法要明显优于其他算法.

为了验证提出算法在低信噪比下成像性能,图 8 中给出了在 SNR = -5dB 下, RD 算法、STFT 算法、WVD 算法、SPWVD 算法和本文提出的算法的 ISAR 成像结果.图 8(a)中给出了 RD 算法的成像结果,除了散焦以外其受噪声影响很严重,和图 6(b)相比飞机轮廓变得更为模糊,难以识别;图 8(b)为 STFT 算法的成像结果,虽然仍能保持模糊的飞机轮廓但其对噪声的抑制能力很弱;图 8(c)为 WVD 算法的成像结果,由于噪声的提高,交叉项的影响越来越严重,几乎无法获得目标的有用信息;SPWVD 通过对交叉项的抑制,只能得到模糊的飞机轮廓,如图 8(d)所示,并且其分辨率有限;而本文提出的 CICPF 算法对噪声有很强的抑制能力,如图 8(e)所示,图像聚焦良好,呈现出完整、清晰的飞机目标成像图,与其他算法相比,对噪声具有很强的抑制能力.由表 4 中 -5dB 下各成像算法的图像信息熵可以看出,在低信噪比环境下,本文提出的 ISAR 成像算法同样优于其他算法.

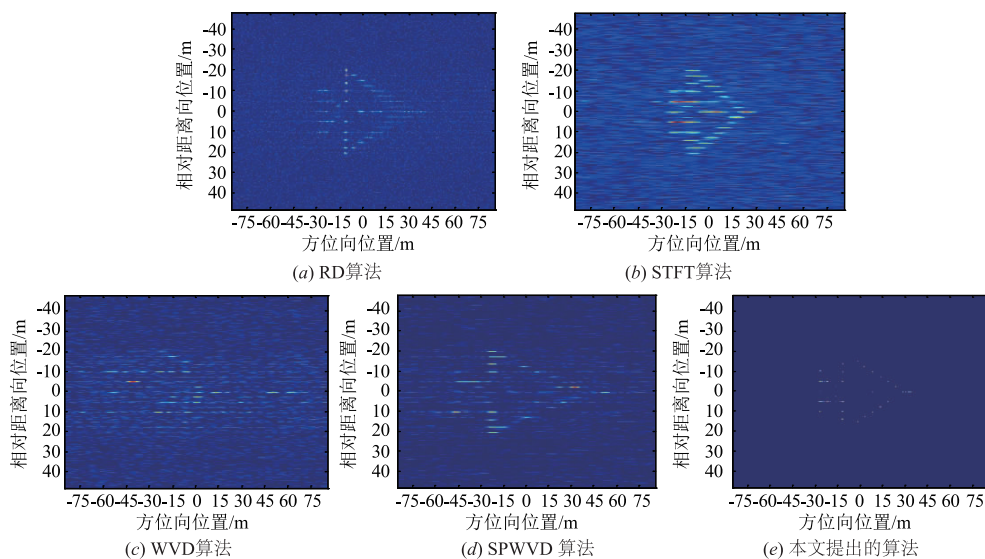


图8 SNR=-5dB下各成像算法对比

表 4 不同成像算法的图像熵结果

ISAR 成像算法	RD 算法	STFT 算法	WVD 算法	SPWVD 算法	本文算法
图像熵(5dB)	8.9414	9.2119	7.7229	6.9616	4.7372
图像熵(-5dB)	11.0204	11.0293	10.1005	8.9398	5.4579

5 结论

针对机动目标的复杂运动导致散射体回波信号多普勒频率时变,导致基于 FFT 的传统 RD 算法失效;本文提出了一种基于相干积累 CPF 的机动目标 ISAR 成像新方法. 首先,把包络对齐后的各距离单元数据,通过 CPF 变换到时间-调频率平面. 然后,利用各散射体自项能量平行于时间轴分布特性,通过沿时间轴对各散射体能量进行相干积累来抑制交叉项和虚假伪峰的影响. 最后,通过向频率轴上的投影得到机动目标的 ISAR 图像,并通过引入 NUFFT 来降低算法计算复杂度.

参考文献

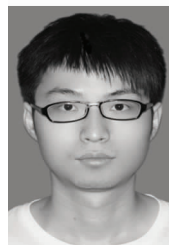
- [1] Ruan H, Wu Y H, Jia X. Novel ISAR imaging algorithm for maneuvering targets based on a modified keystone transform[J]. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 2014, 11(1):128-132.
- [2] Chen V C, Qian S. Joint time-frequency transform for radar range Doppler imaging[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1998, 34(2):486-499.
- [3] Wang Y, Zhao B. Inverse synthetic aperture radar imaging of nonuniformly rotating target based on the parameters estimation of multicomponent quadratic frequency-modulated signals[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(7):4053-4061.
- [4] Chen V C, Miceli W J. Time-varying spectral analysis for radar imaging of maneuvering targets[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 1998, 145(5):262-268.
- [5] Kim K T, Choi I S, Kim H T. Efficient radar target classification using adaptive joint time-frequency processing[J]. IEEE Tran Antennas Propaga, 2000, 48(12):1789-1801.
- [6] Bao Z, Sun C, Xing M D. Time-frequency approaches to ISAR imaging of maneuvering targets and their limitations[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2001, 37(7):1091-1099.
- [7] Berizzi F, Mese E D, Diani M. High-resolution ISAR imaging of maneuvering targets by means of the range instantaneous Doppler technique: Modeling and performance analysis[J]. IEEE Trans Image Process, 2001, 10(12):1880-1890.
- [8] Wang Y, Jiang Y C. ISAR imaging of maneuvering targets based on the L-class of fourth-order complex-lag PWVD[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens Lett, 2010, 48(3):1518-1527.
- [9] Lv X L, Xing M D, Wan C R, Zhang S H. ISAR imaging of maneuvering targets based on the range centroid Doppler technique[J]. IEEE Trans Image Process, 2010, 19(1):141-153.
- [10] 李亚超, 全英汇, 邢孟道. 一种基于时频分布尺度变换的 ISAR 成像新方法[J]. 电子学报, 2009, 37(9):2085-2091.
LI Ya-chao, QUAN Ying-hui, XING Meng-dao. A new method of ISAR imaging based on the scale transform in time-frequency distribution plane[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9):2085-2091. (in Chinese)
- [11] O'Shea, P. A fast algorithm for estimating the parameters of a quadratic FM signal[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2004, 52(2):385-393.
- [12] Wang P, Yang J Y. Multicomponent chirp signals analysis using product cubic phase function[J]. Digital Signal Processing, 2006, 16(6):654-669.
- [13] Wang P, Li H B, Djurović I, Himed B. Integrated cubic phase function for linear FM signal analysis[J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 2014, 46(3):963-977.
- [14] 邢涛, 李军, 王冠勇. 基于非均匀快速傅里叶变换的 SAR 方位向运动补偿算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(5):1023-1029.
Xing tao, Li Jun, Wang Guan-yong. An along-track motion compensation algorithm based on non-uniform fast fourier transform (NUFFT) for SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(5):1023-1029. (in Chinese)
- [15] J Wang, X Liu. Improved global range alignment for ISAR[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2007, 43(3):1070-1075.

作者简介



李 东 男, 1983 年生于内蒙古商都. 重庆大学通信与测控中心教育部重点实验室讲师. 研究方向为 SAR/ISAR 成像算法设计, 参数估计等.

E-mail: lidongcuit@126.com



占木杨 男, 1992 年生于湖北黄冈. 重庆大学电子与通信工程系硕士研究生, 研究方向为 ISAR 成像算法设计以及参数估计.



栗 嘉 男, 1984 年生于广西桂林. 西北工业大学电子信息学院讲师. 研究方向为时频分析, 参数估计等.